بررسی تجربی پارامترهای یک بال‌زن در پرواز ایستا بر عملکرد آیرودینامیکی*

زهرا سادات علوی(۱) محمدحسن جوارشکیان(۲) سجاد محمودی(۳)

چکیده *در این تحقیق، تأثیر دامنهٔ بال‌زنی یک بال‌زن، هم‌زمان با اثر انعطاف‌پذیری بال، بر عملکرد آیرودینامیکی آن، بررسی شده است. برای این هدف، یک مکانیزم بال‌زن با بال پوسته‌ای انعطاف‌پذیر و یک سامانهٔ اندازه‌گیری نیروی پیشران طراحی و ساخته شد. در این آزمایش‌ها، در گستره‌ای از فرکانس‌ها و دامنه‌های بال‌زنی برای دو نمونه بال با انعطاف‌پذیری متفاوت از نظر خمشی و پیچشی، نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دامنهٔ بال‌زنی، میزان نیروی پیشران تولیدی، افزایش می‌یابد، که البته برای دو پوستهٔ بال با ضخامت مختلف متفاوت است.*

واژه‌های کلیدی دامنهٔ بال‌زنی; نیروی پیشران; انعطاف‌پذیری; فرکانس بال‌زنی.

Experimental Study of the Flapping Parameters on the MAV Aerodynamic Performance in Hovering Flight

Z.S. Alavi M.H. Djavareshkian S. Mahmoudi

Abstract *In this research, the flapping amplitude effect and flexible shell on the MAV (Micro Air Vehicle) aerodynamic performance in hovering flight are experimentally investigated. For this purpose, a flapping membrane wing mechanism and an experimental measurement setup for measuring generated thrust were designed and constructed. In these tests, for two wings with different flexibility, generated thrust and power usage were measured in the range of flapping frequency and amplitude. In general, flapping wing generated thrust increases with raising flapping amplitude. Values of the propulsion force are different for these two wings.*

Key Words Flapping Amplitude; Thrust; Flexibility; Flapping Frequency.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۲٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۹ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد هوافضا، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد. javareshkian@um.ac.ir

(۳) کارشناسی ارشد هوافضا، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

بال‌زن‌ها گونه‌ای از وسایل پرنده هستند که مانند پرندگان به‌کمک بال‌هایی انعطاف‌پذیر و مکانیزمی که حرکت بال زدن را فراهم می‌نماید، نیروهای آیرودینامیکی لازم برای پرواز خود را تولید می‌کنند. منبع اصلی تولید نیروهای آیرودینامیکی در پرندگان، حرکت نوسانی بال‌هاست که به‌طور کلی شامل انتقال و دوران با دو درجه آزادی حرکت و یا بیشتر است. به‌واسطهٔ این حرکت‌ها، دنبالهٔ جریان تشکیل می‌شود که آن نیز به‌صورت نیروهای آیرودینامیکی پیشران و غیره ظاهر می‌شود.

بال‌زن‌ها به‌دلیل قابلیت مانورپذیری بالا، بازده پیشرانشی بالا و نیز توان حرکت ایستا با صرف نرخ انرژی مصرفی حداقل، در میان سایر انواع، اخیراً بیشتر مورد بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند. ابعاد کوچک، قابلیت مانور بالا، سرعت پایین و شباهت بال‌زن‌ها به پرندگان، کاربردهای متنوعی را برای آنها متصور کرده است. کسب و ارسال اطلاعات از محیط‌های غیر قابل دسترسی، کارگذاری سنسور، دنبال کردن اشیای خاص، نفوذ به داخل ساختمان‌ها و اماکن مسکونی، پرواز در ارتفاع‌های بالای زمین با جو رقیق برای اهداف هواشناسی، شرکت در عملیات نجات، رفتن به اماکن خطرناک و... از جمله کاربردهای پیشنهادی برای بال‌زن‌ها می‌باشند.

اگرچه انسان‌ها از هزاران سال قبل به مشاهدهٔ پرواز پرندگان و تقلید از مکانیزم پرواز آنان برای ساخت وسایل پرنده پرداخته‌اند اما تا حدود قرن نوزدهم میلادی هیچ مطالعهٔ علمی در این مورد ثبت نشده است. از این زمان، به‌تدریج مطالعات مختلفی در زمینهٔ پرواز پرندگان انجام شد و این مطالعات به مرور زمان با پیشرفت علم و تکنولوژی و درنتیجه ابزار اندازه‌گیری، شکل مدون و تازه‌ای به خود گرفتند. در جدیدترین پژوهش‌ها، در سال ۲۰۰۸ اسوانبرگ [1] مطالعاتی بر روی بال‌های مختلف از جنبه‌های اسکلت‌بندی و هندسه‌های گوناگون انجام داد، هم‌چنین او در این آزمایش‌ها، از مواد مختلفی برای ساخت پوستهٔ بال استفاده کرد تا تأثیر جنس بال را نیز مورد مطالعه قرار دهد. هو و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۹ [2] و ۲۰۱۰ [3]، با ثابت در نظر گرفتن هندسه و اسکلت‌بندی بال، انعطاف‌پذیری بال‌های پوسته‌ای را با انتخاب سه نوع مادهٔ چوب، نایلون و لاتکس در سرعت‌های باد مختلف و گستره‌ای از فرکانس‌های بال‌زنی بررسی کردند. در همین سال پارکر [4] تحقیقاتی بر روی تفاوت بال‌های پوسته‌ای و ایرفویل‌دار و هم‌چنین اشکال مختلف بال و یافنگ و همکارانش [5] مطالعاتی بر روی تأثیر فرکانس بال‌زنی، حداکثر زاویهٔ بال‌زنی و سرعت باد بر روی نیروهای آیرودینامیکی برآ و پیشرانش انجام دادند. اسلادک [6] و تاناکا و همکارانش [7] طی تحقیقاتی جداگانه، در سال ۲۰۱۱ به‌ترتیب اسکلت‌بندی و هندسه‌های مختلف بال حشرات و تأثیر خمش و پیچش بال‌های انعطاف‌پذیر حشرات بر تولید نیروی برآ در پرواز ایستا را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. در ادامه در سال ۲۰۱۲، کورتیس و همکارانش [8] مطالعهٔ بال‌های پوسته‌ای از جنس مایلر با هندسه‌های متفاوت و بال‌های پوسته‌ای از جنس لاتکس با اسکلت‌بندی با لوله‌های آلومینیومی و سیم‌های فولادی به‌صورت انحنادار را به پایان رساندند و نیز در همین سال، ها و همکارانش [9] با مشابه‌سازی یک نوع سوسک پرنده، تأثیر مواد مختلف در ساخت بال را در پرواز ایستا و رو به جلو مورد آزمایش قرار دادند.

ابراهیمی و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۰ [10] و ۲۰۱۱ [11, 12] برای مطالعهٔ تجربی نیروهای ناپایای برآ و پیشران تولید شده از یک سامانهٔ بال‌زن و حسگرهای اندازه‌گیری نیرو و توان مصرفی استفاده کردند که توسط آن، نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی ناپایدار، مصرف توان و سرعت زاویه‌ای حرکت بال‌زنی را در فرکانس‌های بال‌زنی مختلف و برای بال‌های

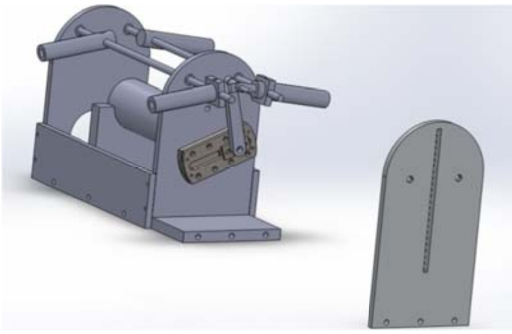
متفاوت (از نظر انعطاف‌پذیری) در پرواز کروز با سرعت‌های باد متفاوت و ایستا (hovering) یا بدون باد اندازه‌گیری شد.

یانگ و همکارانش نیز که از سال ۲۰۰۹ [13] روی پرندهٔ بال‌زن خود به نام گلدن اسنیچ (با وزن ۵/۹ گرم) کار می‌کردند و توانسته بودند تا سال ۲۰۱۰، زمان پروازی این پرنده را به بیش از ٤٨٠ ثانیه برسانند، در سال ۲۰۱۲ در جدیدترین مطالعات خود متوجه شدند که اگر با ایجاد تغییراتی در ریب کربنی لبهٔ حملهٔ بال، حالت پرواز پرنده را که از نمای جانبی مشابه عدد هشت انگلیسی است، بهبود ببخشند، عملکرد آیرودینامیکی پرنده ارتقا می‌یابد [14,15].

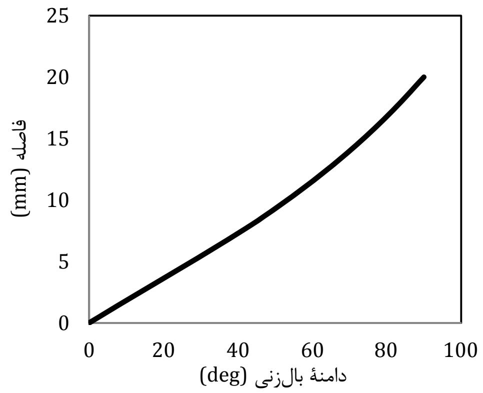
در آزمایش‌های تجربی و تحقیقاتی که تا به امروز انجام شده است، تغییر دامنهٔ بال‌زنی به‌صورت هم‌زمان با حوزه‌های دیگر مانند انعطاف‌پذیری انجام نشده است، زیرا این بررسی نیازمند ساخت یک مکانیزم بال‌زن با قابلیت تغییر دامنهٔ بال‌زنی است که به‌دلیل پیچیده شدن مکانیزم، تا کنون، خیلی مورد توجه طراحان قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش، با توجه به همین موضوع، چیدمانی آزمایشگاهی شامل مکانیزم بال‌زن با قابلیت تغییر دامنهٔ بال‌زنی و حسگر نیرو برای اندازه‌گیری نیروی ناپایای پیشران تولیدشده در حرکت بال‌زدن در حالت ایستا و در فرکانس‌های بال‌زنی مختلف طراحی و ساخته شده است تا بتوان اثر دامنهٔ بال‌زدن یک بال‌زن را هم‌زمان با تغییر انعطاف‌پذیری پوستهٔ آن بررسی کرد.

چیدمان آزمایش

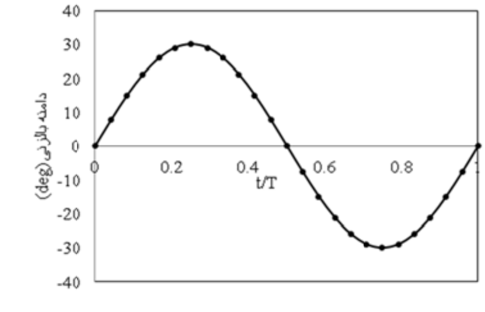
مکانیزم بال‌زن اصلی‌ترین قسمت این دستگاه است که عمل بال‌زدن را ایجاد می‌کند. در این دستگاه، برای ایجاد حرکت بال‌زنی و نیز قابلیت تغییر دامنهٔ بال‌زنی، یک مکانیزم تبدیل حرکت دورانی به خطی برای به حرکت درآوردن **بال** توسط سیستم لنگ طراحی شده است (شکل ۱). برای سامانهٔ لنگ طراحی شده نمودار تعیین دامنهٔ بال‌زنی براساس فاصلهٔ محور لنگ از محور مدور که در نمودار به اختصار «فاصله» قید شده است، در شکل (۲) قابل مشاهده است. نمای سه‌بعدی مکانیزم طراحی شده در شکل (۱) ارائه شده است. هم‌چنین سینماتیک دامنهٔ بال‌زنی ایجاد شده در ریشه بال برای دامنهٔ بال‌زنی ٦٠ درجه، در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۱ مکانیزم بال‌زنی با قابلیت تغییر دامنهٔ بال‌زنی



شکل ۲ نمودار لنگ برای تنظیم دامنهٔ بال‌زنی



شکل ۳ نتایج سینماتیک دامنهٔ بال‌زنی ایجاد شده در ریشهٔ بال برای زاویهٔ ٦٠ درجه

مکانیزم شرح داده شده برای حرکت و کنترل فرکانس بال‌زنی به یک سروو موتور DC متصل می‌شود. سروو موتور DC نصب شده (به مدل BLD10-R-42BL105L2 از شرکت مونز)، قابلیت تنظیم دور موتور و یا فرکانس بال‌زنی را تا ۵ هرتز از طریق نرم‌افزار مخصوص (Utility SCL) دارد. برای اندازه‌گیری نیروی پیشران تولید شده توسط حرکت بال‌زنی، از یک نیروسنج یک‌محوره (STC Lasoux نوع S) در جهت تیروی پیشرانش (در حالت استاتیکی خالص نیرو در جهت برآ صفر است و نیازی به اندازه‌گیری آن نیست)، استفاده می‌شود. چیدمان بال‌زن و حسگر نیرو را در شکل (٤) مشاهده می‌کنید.



شکل ٤ چیدمان بال‌زن و حسگر نیرو

از ویژگی‌های خاص این دستگاه اندازه‌گیری می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱-دقت بسیار بالا به‌دلیل استفاده از ابزار دقیق مانند نیروسنج با دقت بالا در حدود ۲۰ میلی‌نیوتون، سرووموتور الکتریکی با قابلیت تنظیم فرکانس بال‌زنی با دقت ۰/۰۰٤۲ هرتز.

۲-ثبت آنی و لحظه‌ای اطلاعات در کامپیوتر از طریق کارت داده‌برداری و نرم‌افزار طراحی شده در متلب.

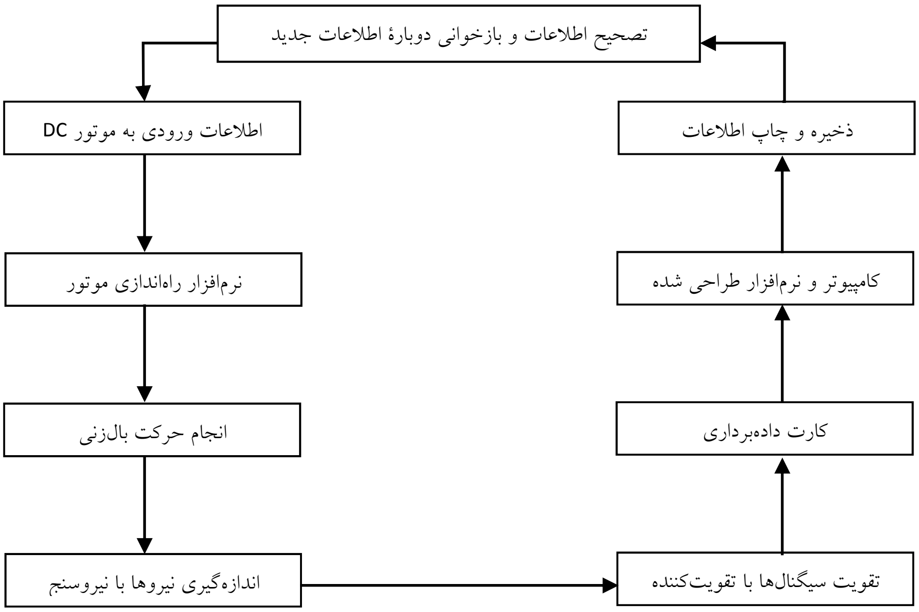
۳-کاهش میزان زیادی از اصطکاک‌ها و لقی‌ها در مکانیزم‌های بال‌زنی با تغییرات لحاظ شده از جمله حذف چرخدنده‌ها.

٤-قابلیت انجام انواع آزمایش‌ها با تنظیم دامنه و فرکانس بال‌زنی دلخواه و انواع گوناگونی از بال‌ها در هندسه‌ها و اسکلت‌بندی‌های مورد نظر.

دقت این نیروسنج ۰/۰۵ درصد بیشترین میزان قابل اندازه‌گیری توسط آن (۱۰۰نیوتون) است. نیروسنج به‌صورت استاتیکی با استفاده از اوزان مشخصی کالیبره می‌شود و فاکتورهای کالیبراسیون اندازه‌گیری شده برای تبدیل سیگنال‌های ولتاژ نسبی به نیرو استفاده می‌شود. داده‌های خروجی از نیروسنج (نیروی پیشران اندازه‌گیری شده) بعد از عبور از تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر (به مدل DN-AM100 از شرکت داسل) توسط کارت اخذ داده (PCI-1710HG از شرکت Advantech) به کامپیوتر منتقل و توسط شبیه‌ساز طراحی شده در سیمولینک نرم‌افزار متلب ثبت می‌شود. برای میانگین‌گیری بعد از هر داده‌برداری با حدود بیش از ۵۰۰ نمونه و حذف اغتشاشات اضافی ناشی از دوران موتور و حرکت بال‌زنی به‌کمک فیلتر پایین‌گذر مرتبهٔ سوم، برای میانگین‌گیری از تابع تبدیل فوریه موجود در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. فلوچارت نحوهٔ انجام آزمایش به‌صورت خلاصه در شکل (۵) ارائه شده است.

بال‌های مورد بررسی. مطالعهٔ اثر دامنهٔ بال‌زنی بر تولید نیروی پیشران در پرواز ایستا، با دو بال با ضخامت پوستهٔ مختلف از نظر انعطاف‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا دو نمونه بال با ابعاد و مساحت یکسان (ارائه شده در جدول ۱) اما با مشخصات ضخامت پوستهٔ متفاوت به‌صورتی که در جدول (۲) آمده است، ساخته شد. جنس پوستهٔ این بال‌ها از پلاستیک، و اسکلت‌بندی آنها از یک اسپار (Spar)

اصلی در لبهٔ جلویی بال، یک اسپار فرعی در لبهٔ عمودی بال و ۲ ریب (Rib) میانی تشکیل شده است. شماتیک این بال‌ها و نام‌گذاری ابعاد آن‌ها در شکل (٦) و نمای دو بال ساخته شده در شکل‌های (۸ و ۷) ارائه شده است.



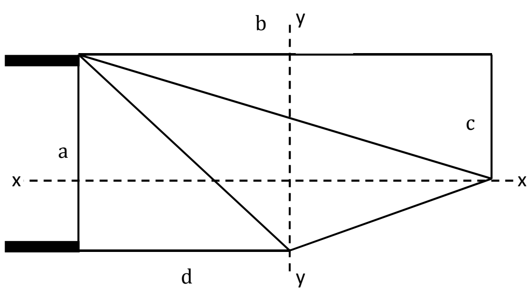
شکل ۵ فلوچارت نحوهٔ انجام آزمایش و داده‌برداری

جدول ۱ مشخصات ابعادی بال‌های A و B

a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)	مساحت (m^2)	نسبت منظری
۷/۸	۲٦	۱۳	۱۵	۰/۰۳۰۹	۲/۱۸

جدول ۲ مشخصات پوسته و اسکلت‌بندی بال‌های A و B

بال	جنس پوسته	ضخامت پوسته (mm)	جنس اسکلت‌بندی	قطر اسکلت‌بندی (mm)
بال A	پلاستیک	۰/۰۳	کربن	۲
بال B	پلاستیک	۰/۰۹	کربن	۲



شکل ٦ شماتیک بال طراحی شده و نام‌گذاری ابعاد آن

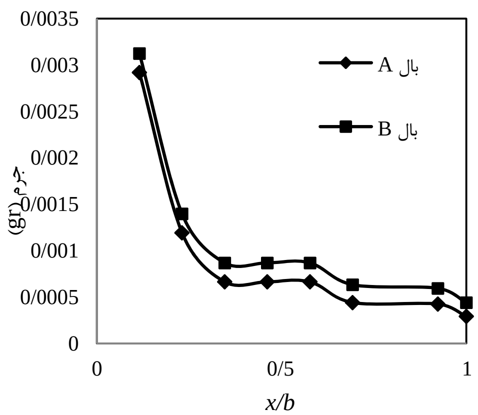


شکل ۷ نمایی از بال پوسته‌ای انعطاف‌پذیر A



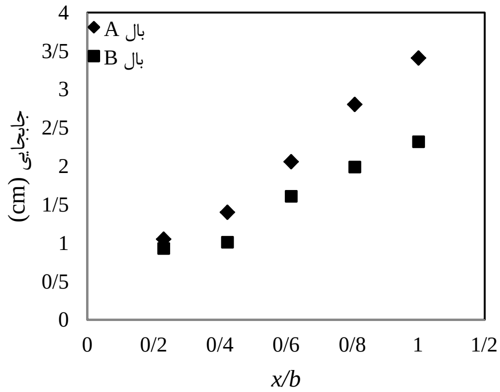
شکل ۸ نمایی از بال پوسته‌ای انعطاف‌پذیر B

توزیع جرم دو بال A و B در شکل (۹) نشان داده شده است که در نهایت هرکدام از بال‌های A و B به‌ترتیب در حدود ۷/۲ و ۸/۸ گرم وزن دارند.

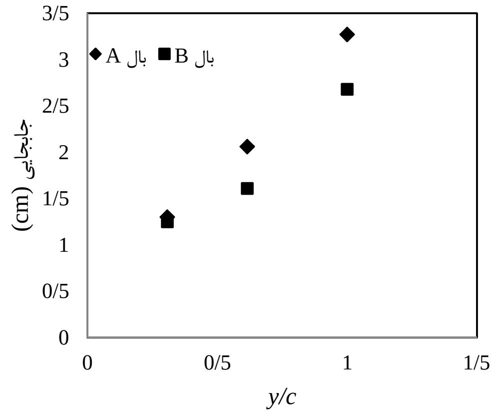


شکل ۹ توزیع جرم بال‌های A و B نسبت به راستای طول بال

برای مقایسهٔ انعطاف‌پذیری این دو بال، با استفاده از روش‌های تجربی، بال به‌صورت یک سر درگیر، به‌عنوان نمونه، تحت بارگذاری به مقدار ۰/۵ نیوتون در موقعیت‌های مختلف در راستای x-x و y-y (شکل ۵) قرار گرفته است. سپس میزان جابه‌جایی آن نسبت به محور خمش (ریشهٔ بال) و پیچش (لبهٔ حمله بال) اندازه‌گیری و نتایج آن (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) به‌عنوان شاخصی از سختی خمشی و پیچشی در دو بال مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۱۰ مقایسه میزان جابجایی نقاطی از بال‌های A و B تحت بارگذاری ۰/۵ نیوتون در راستای طولی x-x



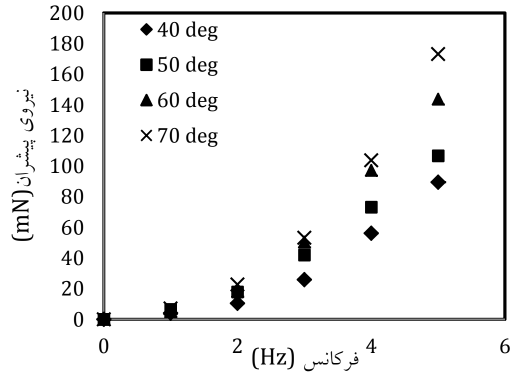
شکل ۱۱ مقایسه میزان جابجایی نقاطی از بال‌های A و B تحت بارگذاری ۰/۵ نیوتون در راستای عرضی y-y

همان‌طور که در دو شکل (۱۱ و ۱۰) دیده می‌شود، بال A در آزمایش‌های خمش و پیچش، جابه‌جایی بیشتری را نشان داده است لذا به‌طور مشخص می‌توان دریافت که سختی خمشی و پیچشی بال A کمتر از بال B و در نتیجه بال A انعطاف‌پذیری بیشتری از نظر خمشی و پیچشی داراست.

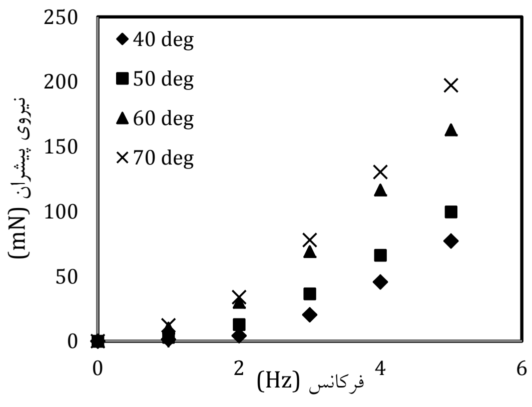
نتایج

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در ٤ دامنهٔ بال‌زنی ٤٠، ٥٠، ٦٠ و ٧٠ درجه به‌طور جداگانه در شکل‌های (۱۳ و ۱۲) نشان داده شده است. در تمام

آزمایش‌ها، زاویهٔ حمله برای تمام بال‌ها برابر صفر و دامنهٔ بال‌زنی به‌صورت متقارن تنظیم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، میزان نیروی پیشرانش با بالا رفتن فرکانس و دامنهٔ بال‌زنی تقریباً با یک تابع درجه ۲ در حال زیاد شدن است. اما برای مقایسهٔ تأثیر دامنهٔ بال‌زنی و انعطاف‌پذیری پوستهٔ بال به‌طور هم‌زمان بر نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی، نمودارهای دیگری تهیه شده است که در ادامه شرح داده می‌شود.

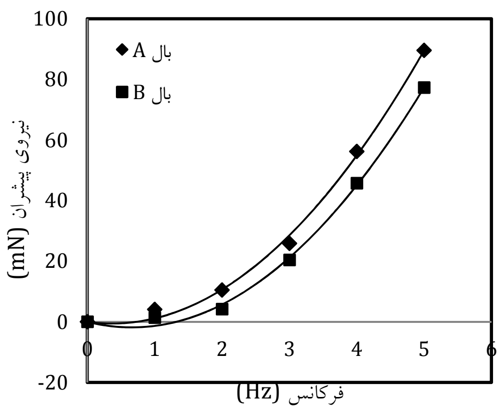


شکل ۱۲ نمودار نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال A در دامنه‌های بال‌زنی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه

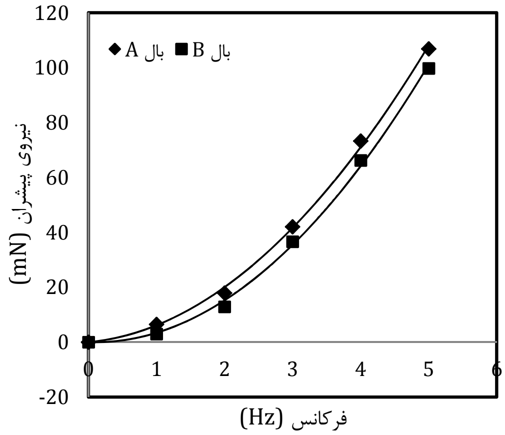


شکل ۱۳ نمودار نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال B در دامنه‌های بال‌زنی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه

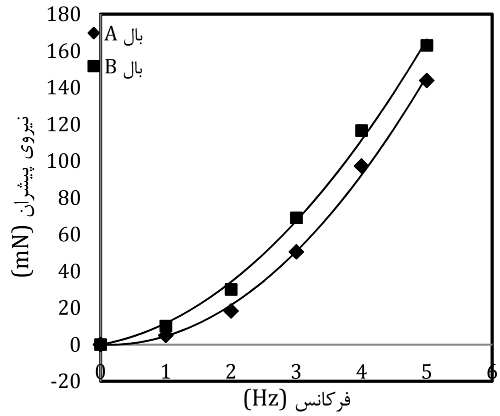
در شکل‌های (۱۷-۱٤) نیروی پیشران تولیدی به‌ترتیب برای دامنه‌های بال‌زنی ۴۰ تا ۷۰ درجه به‌صورت مجزا رسم شده است. در دامنهٔ بال‌زنی ۴۰ درجه (شکل ۱٤) میزان نیروی پیشران تولیدی برای بال A بیشتر از بال B است. در دامنهٔ بال‌زنی ۵۰ درجه (شکل ۱۵) تفاوت مقدار نیروی پیشران تولیدی دو بال کمتر می‌شود اما هم‌چنان نیروی پیشران بال A بیشتر از بال B است. در شکل (١٦) دیده می‌شود که مقدار نیروی پیشران بال A کمتر از بال B می‌شود. همین روند در دامنهٔ بال‌زنی ۷۰ درجه نیز تکرار می‌شود. این نشان می‌دهد که بال A در دامنه‌های بال‌زنی ۴۰ و ۵۰ درجه توانسته است از بال B در تولید نیروی پیشران موفق‌تر عمل کند در حالی که در دامنه‌های بال‌زنی ۶۰ و ۷۰ درجه، بال B که انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به بال A دارد، عملکرد بهتری داشته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که بال‌های انعطاف‌پذیر در دامنه‌های بال‌زنی پایین تا حدود ۵۰ درجه نیروی پیشران بیشتری تولید می‌کنند و برای دامنه‌های بال‌زنی بالاتر، بال با انعطاف‌پذیری کمتر، مناسب‌تر است. دلیل آن این است که بال با انعطاف‌پذیری بالا در راستای خمشی و پیچشی، در دامنه‌های بال‌زنی بالاتر دارای تغییرات زیاد و بیش از حد مجازی در انحنای پوستهٔ خود در راستای طولی و عرضی می‌گردد که این عامل در پایین آمدن عملکرد بال در تولید نیروی پیشران و تولید نیروهای غیرمفید مؤثر است.



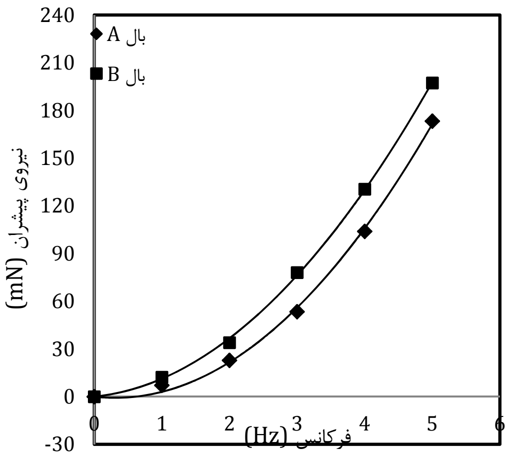
شکل ١٤ نمودار نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ٤٠ درجه



شکل ۱۵ نمودار نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ۵۰ درجه

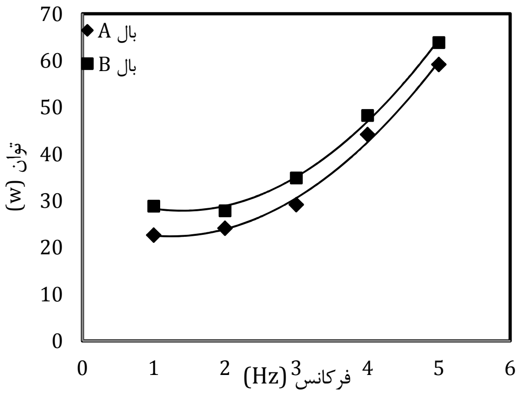


شکل ١٦ نمودار نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ٦۰ درجه

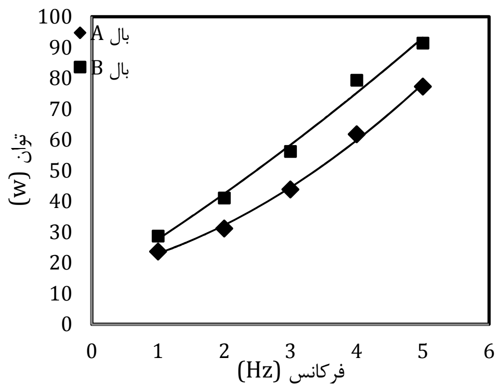


شکل ۱۷ نمودار نیروی پیشران برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ۷۰ درجه

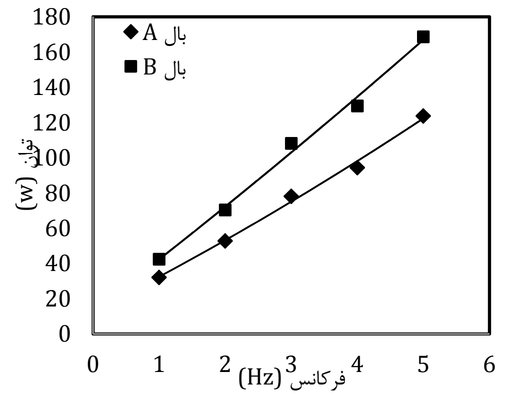
شکل‌های (۲۱-۱۸) رفتار تغییرات تـوان مصـرفی نسبت به فرکانس بال‌زنی را برای دامنه‌های بال‌زنی ٤۰ تا ۷۰ درجه نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رود، میزان توان مصرفی به‌ازای فرکانس بال‌زنی تقریباً با یک تابع درجه ۲ در تمام آزمایش‌ها افزایش می‌یابـد. ولـی همان‌طور که در مجموعـهٔ نمودارهـای تـوان مصـرفی پیداست، برخلاف رونـد تغییـرات نیـروی پیشـران در دامنه‌های بال‌زنی کم و زیاد، در تمـام شـکل‌هـا میـزان توان مصرفی بال A کمتر از بال B می‌باشد، کـه علـت آن سبک‌تر بودن ایـن بـال و در نتیجـه نیـاز بـه تـوان مصرفی کم‌تر برای راه‌اندازی و حرکت دورانی مکانیزم است.



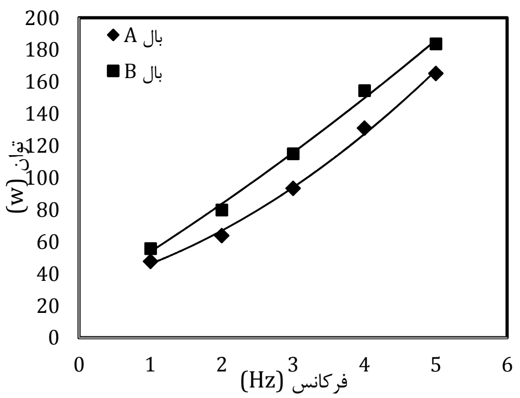
شکل ۱۸ نمودار توان مصرفی برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ٤۰ درجه



شکل ۱۹ نمودار توان مصرفی برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ۵۰ درجه

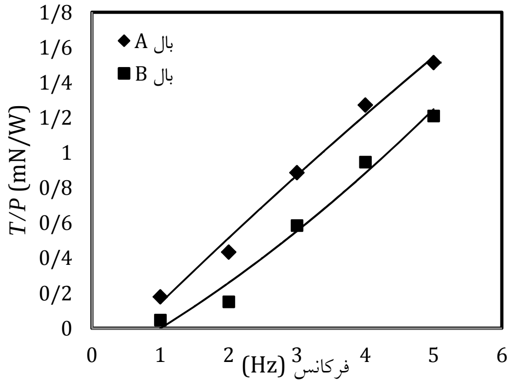


شکل ۲۰ نمودار توان مصرفی برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ٦۰ درجه

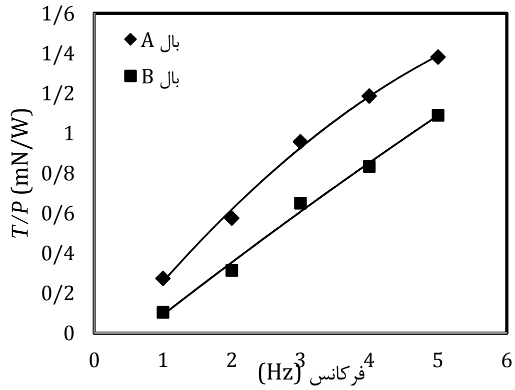


شکل ۲۱ نمودار توان مصرفی برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ۷۰ درجه

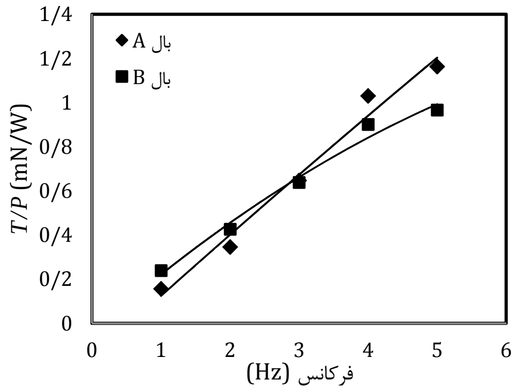
برای این‌که بتوان برای عملکرد آیرودینامیکی بال، نتایج نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی را جمع‌بندی کرد و یک نتیجهٔ واحد ارائه داد، از پارامتر مداومت پروازی با تعریف نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی استفاده می‌شود. نمودار مداومت پروازی برحسب فرکانس بال‌زنی برای دامنه‌های بال‌زنی ٤۰ تا ۷۰ درجه در شکل‌های (۲۵-۲۲) رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی، نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی برای هر دو بال به‌طور جداگانه از دامنهٔ بال‌زنی ٤۰ درجه تا دامنهٔ بال‌زنی ۷۰ درجه در حال کاهش است اما این کاهش مداومت پروازی در بال A آشکارتر و با اختلاف بیشتری در هر دامنهٔ بال‌زنی قابل مشاهده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت، افزایش دامنهٔ بال‌زنی در این آزمایش‌ها با این‌که باعث تولید نیروی پیشران بیشتر می‌شود اما چون از طرفی، میزان توان مصرفی را نیز افزایش می‌دهد لذا باید طراح، با بهینه‌سازی هدف خود که می‌تواند تولید نیروی پیشران بیشتر یا مداومت پروازی بالاتر باشد، از این نتایج بهره گیرد. اما برای مقایسهٔ دو بال A و B، همان‌طور که در شکل (۲۲) دیده می‌شود، در دامنهٔ بال‌زنی ٤۰ درجه، شاخص مداومت پروازی برای بال A یا همان بال انعطاف‌پذیرتر بیشتر از بال B است. در دامنهٔ بال‌زنی ۵۰ درجه نیز هم‌چنان مداومت پروازی بال A بالاتر است؛ اما در دامنهٔ بال‌زنی ٦۰ درجه (شکل ٢٤) مداومت پروازی بال B تمایل به مقادیر بیشتری از مداومت پروازی بال A دارد و لذا نمودار بال B در حال عبور از بال A آن را قطع کرده است. در ادامهٔ همین روند، در شکل (۲۵) مشاهده می‌شود که نمودار مداومت پروازی بال B کاملاً از نمودار بال A عبور کرده است و مقادیر بیشتری را نسبت به نمودار مداومت پروازی بال A به خود اختصاص داده است. مشابه این روند در تولید نیروی پیشران نیز بین دو بال A و B رخ داد. می‌توان به این صورت نتیجه‌گیری کرد که تولید نیروی پیشران و شاخص مداومت پروازی برای بال‌های انعطاف‌پذیر در دامنه‌های بال‌زنی بالا، قابل توجیه نیست و لذا اگر نیاز به حرکت بال‌زنی در دامنه‌های بال‌زنی بالاتر از تقریباً ۵۰ درجه نیاز است، بهتر است از بال‌های با انعطاف‌پذیری تا حدودی کمتر استفاده کرد هرچند همان نتیجهٔ کلی را نیز هم‌چنان باید در نظر داشت که نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی برای هر دو بال با افزایش دامنهٔ بال‌زنی کاهش می‌یابد؛ اما همین کاهش کلی نیز برای بال B بازهٔ کمتری را شامل می‌شود به‌طوری که برای بال A، از دامنهٔ بال‌زنی ٤۰ تا ۷۰ درجه، مداومت پروازی حدوداً ۳۰ درصد و برای بال B تقریباً ۲۰ درصد کاهش داشته است.



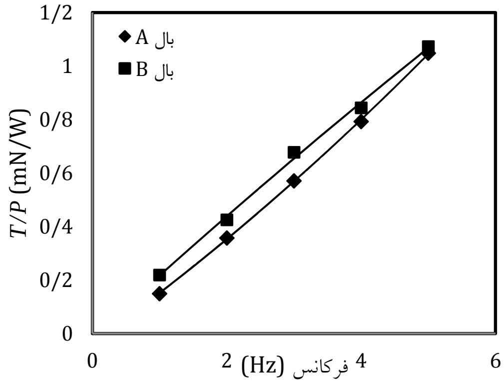
شکل ۲۲ نمودار نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی (مداومت پروازی) برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ٤۰ درجه



شکل ۲۳ نمودار نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی (مداومت پروازی) برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ۵۰ درجه



شکل ٢٤ نمودار نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی (مداومت پروازی) برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ٦۰ درجه



شکل ۲۵ نمودار نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی (مداومت پروازی) برحسب فرکانس بال‌زنی برای بال‌های A و B در دامنهٔ بال‌زنی ۷۰ درجه

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، تأثیر هم‌زمان تغییر دامنهٔ بال‌زنی و انعطاف‌پذیری بال، در حرکت بال‌زنی ایستا، به‌کمک بررسی عملکرد آیرودینامیکی آن تحقیق شده است. بدین منظور یک چیدمان آزمایشگاهی شامل یک مکانیزم بال‌زن با قابلیت تغییر دامنهٔ بال‌زنی و حسگر نیرو ساخته شد. سپس ۲ بال با ضخامت پوسته مختلف با سختی خمشی و پیچشی متفاوت، مورد تحقیق قرار گرفتند. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱- مقدار توان مصرفی در تمام فرکانس‌ها و دامنه‌های بال‌زنی برای بال با انعطاف‌پذیری بیشتر (A)، مینیمم است.

۲- هر دو پارامتر نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی بال‌زن با زیاد شدن فرکانس بال‌زنی تقریباً با یک تابع درجه ۲، افزایش می‌یابند.

۳- نرخ تولید نیروی پیشران با افزایش فرکانس بال‌زنی، افزایش می‌یابد.

٤- نیروی پیشران تولید شده توسط بال A (انعطاف‌پذیرتر) در دامنه‌های بال‌زنی ٤۰ و ۵۰ درجه بیشتر از بال B و در دامنه‌های بال‌زنی ٦۰ و ۷۰ درجه کمتر از بال B است.

۵- مداومت پروازی بـا افـزایش دامنـهٔ بـال‌زنـی از ۴۰ درجه تا ۷۰ درجه برای بال A، در حدود ۳۰ درصـد و برای بال B در حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

٦- مداومت پروازی تا دامنهٔ بال‌زنی ۵۰ درجه برای بال انعطاف‌پذیرتر (A) مقادیر بیشتری را نشان می‌دهـد در حالی‌که در دامنهٔ بال‌زنی ٦۰ درجه، برای دو بال تقریبـاً به هم می‌رسد و در دامنهٔ بـال‌زنـی ۷۰ درجـه، بـال بـا انعطاف‌پذیری کمتر خمشی و پیچشی، مقادیر مداومت پروازی بالاتری را به خود اختصاص می‌دهد کـه دلیـل آن، تغییــرات بــیش از حــد پوســتهٔ انعطــاف‌پــذیرتر و درنتیجه کاهش نیروی مفید تولیدی توسط بال است.

۷- بـال‌هـای بـا سـختی خمشـی و پیچشـی پـایین‌تـر (انعطاف‌پذیرتر) در دامنه‌های بال‌زنی پایین تا حدود ۵۰ درجه، عملکرد آیرودینامیکی بهتری دارنـد ولـی بـرای دامنه‌های بال‌زنی بالاتر، این بال‌ها این شرایط را ندارند.

فهرست علائم

x/b　نسبت فاصله در راستای طول بال به دهانهٔ بال

y/c　نسبت فاصله در راستای عرض بال به وتر بال

T　نیروی پیشران (mN)

P　توان مصرفی (w)

مراجع

1. Svanberg, C.E., "Biomimetic micro air vehicle testing development and small scale flapping-wing analysis", M.Sc thesis, Air force institute of technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, (2008).
2. Hu, H., Kumar, A.G., Abate, G. and Albertani, R., "An Experimental Study of Flexible Membrane Wings in Flapping Flight", *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Jan. 5 – 8, Orlando, Florida, (2008).
3. Hu, H., Kumar, A.G., Abate, G. and Albertani, R., "An experimental investigation on the aerodynamic performances of flexible membrane wings in flapping flight", *Aerospace Science and Technology*, 14, 575–586, (2010).
4. Parker, G. and Borbone, J., "Wing and gliding dynamics of a flapping winged ornithopter", World Automation Congress, TSI Press, (2010).
5. Yafeng, Z., Zhanke, L., Wenping, S. and Bifeng, S., "Lift and Thrust Characteristics of The Flapping Wing Micro Air Vehicle", *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*, (2010).
6. Sladek, N. J., "Flapping wing micro air vehicle wing manufacture and force testing", M.Sc. thesis, Air institute of technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, (2011).
7. Tanaka, H., Whitney, J.P. and Wood, R.J., "Effect of flexural and torsional wing flexibility on lift generation in hoverfly flight", *Integrative and Comparative Biology*, Vol. 51, No. 1, pp. 142–150, (2011).
8. Curtis, D.H., Reeder, M.F., Svanberg, C.E., Cobb, R.G. and Parker, G.H., "Flapping Wing Micro Air Vehicle Bench Test Setup", *International Journal of Micro Air Vehicles*, Vol. 4, Issue 1, pp. 51-78, (2012).
9. Ha, N.S., Nguyen, Q.V., Goo, N.S. and Park, H.C., "Static and Dynamic Characteristics of an Artificial Wing Mimicking an Allomyrina Dichotoma Beetle’s Hind Wing for Flapping-Wing Micro Air Vehicles", *Experimental Mechanics*, No.52, pp.1535–1549, (2012).
10. Mazaheri, K. and Ebrahimi, A., "Experimental study on interaction of aerodynamics with flexible wings of flapping vehicles in hovering and cruise flight", *Arch Appl Mech*, No.80, pp. 1255–1269,

(2010).

11. Mazaheri, K. and Ebrahimi, A., "Experimental investigation of the effect of chordwise flexibility on the aerodynamics of flapping wings in hovering flight", *J. Fluids Structure*, No. 26(4), pp. 544–558, (2011).
12. Mazaheri, K. and Ebrahimi, A., "Experimental investigation on aerodynamic performance of a flapping wing vehicle in forward flight", *Journal of Fluids and Structures*, No. 27, pp. 586–595, (2011).
13. Yang, T.M. and Hsiao, F.Y., "Dynamics of flapping micro-aerial vehicles, American Control Conference Hyatt Regency Riverfront", St. Louis, MO, USA, (2009).
14. Hsiao, F.Y., Yang, T.M. and Lu, W.C., "Dynamics of flapping-wing MAVs: application to the Tamkang Golden Snitch", *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 227-238, (2012).
15. Yang, L., "The micro-air-vehicle Golden Snitch and its figure-of-8 flapping", *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 197212, (2012).